

Article

<https://doi.org/10.7850/jkso.2023.28.1.041>  
pISSN : 1226-2978 eISSN : 2671-8820

## CTD용 박막형 용존산소 센서의 현장 교정

강동진<sup>1,2\*</sup> · 김예슬<sup>3</sup><sup>1</sup>한국해양과학기술원 해양환경연구센터 책임연구원, <sup>2</sup>과학기술연합대학원 한국해양과학기술원스쿨 해양과학전공 교수,<sup>3</sup>한국해양과학기술원 해양환경연구센터 선임급연수연구원

## *In-situ* Calibration of Membrane Type Dissolved Oxygen Sensor for CTD

DONG-JIN KANG<sup>1,2\*</sup> AND YESEUL KIM<sup>3</sup><sup>1</sup>Principal Research Scientist, Marine Environment Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology (KIOST), Busan 49111, Korea<sup>2</sup>Professor, Department of Ocean Science, University of Science & Technology (UST), Daejeon 34113, Korea<sup>3</sup>Post Doctoral Scientist, Marine Environment Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology (KIOST), Busan 49111, Korea\*Corresponding author: [djocean@kiost.ac.kr](mailto:djocean@kiost.ac.kr)

Editor Man Sik Choi

Received 17 November 2022; Revised 3 February 2023; Accepted 6 February 2023

### ABSTRACT

용존산소 센서는 그 특성상 시간이 지남에 따라 자료의 변형(drift)이 일어난다. 따라서 용존산소 센서를 이용하여 해수 중의 정확한 용존산소 농도를 측정하기 위해서는 반드시 용존산소 센서의 현장 교정이 필요하다. 현장 교정 방법과 교정을 위한 적절한 시료의 개수 및 용존산소 센서의 실험실 교정주기를 제시하고자 약 1년에 걸쳐 인도양, 태평양, 동해에서 수행된 세 번의 서로 다른 항차에서 총 133개의 용존산소 분석을 위한 시료를 획득하였다. 화학 분석을 통해 얻은 용존산소 분석값과 센서값을 비교 분석하였다. 그 결과 제조사에서 제시하는 센서의 출력전압과 용존산소 분석값을 비교하기보다는 센서에서 주는 최종 농도값과 분석값을 직접 비교하여 얻은 직선의 관계식을 이용하여 센서의 측정값을 교정하는 것이 바람직하고, 박막형 용존산소 센서의 경우 정확한 보정을 위해서는 최소한 30개 이상의 시료에 대한 분석값을 이용해야 약 1% 이내의 정확도 범위 내에서 현장 교정이 가능하다. 또한 CTD 용 박막형 용존산소 센서가 70% 이상의 성능을 내기 위해서는 1년 이내의 주기로 실험실 또는 제조사에서 이루어지는 실험실 교정을 수행할 것을 권장한다.

Dissolved oxygen sensors have characteristics in which data drift occurs over time. Therefore, *in-situ* calibration of the dissolved oxygen sensor is essential to accurately measure the concentration of dissolved oxygen in seawater. In order to provide a method for *in-situ* calibration, appropriate number of samples for calibration, and laboratory calibration interval of the dissolved oxygen sensor, the dissolved oxygen sensor values were compared with the measured values by titration on a total of 133 samples from three different cruises in the Indian Ocean, Pacific Ocean, and East Sea over a period of about one year. As a result, it is preferable to calibrate the sensor value using the correlation of a straight line obtained by directly comparing the final concentration value given by the sensor and the measured value. For the accurate calibration, at least 30 samples must be used to enable *in-situ* calibration within an accuracy range of about 1%. In addition, it is recommended that a laboratory calibration should perform within 1 year for the membrane type dissolved oxygen sensor for CTD to achieve a performance of 70% or more.

**Keywords:** Dissolved oxygen, Membrane type DO sensor, *in-situ* Calibration, Calibration period

## 1. 서론

해양에서 용존산소는 해양-대기 간의 기체 교환과 식물에 의한 광합성과 각종 생물들의 호흡 즉, 유기물의 분해 등에 의해 그 분포가 조절된다. 또한 용존산소는 해양에서 생물이 살아가는 데에 필수적인 물질이고, 이러한 용존산소의 분포를 통하여 해양에서 일어나는 다양한 물리, 화학, 생물학적인 현상을 이해하기도 한다.

최근 CTD에 장착된 센서를 이용하여 연속적인 자료를 손쉽게 획득할 수 있게 되면서 용존산소 센서를 이용한 관측이 일 반화되었다. 용존산소 센서를 사용하는 경우 수심에 따른 용존산소의 미세한 변화를 실시간으로 얻을 수 있는 장점이 있는 반면에 센서의 주기적인 교정(calibration) 등의 적절한 관리가 이루어지지 않는 경우 왜곡된 자료를 줄 수 있다.

용존산소 센서는 그 작동 원리에 따라 크게 전기화학 센서와 광학센서, 두 가지로 분류된다. 이 중 광학센서는 산소와 반응 하여 형광을 내는 물질에 빛을 주사하고 여기서 나오는 형광을 측정하여 용존산소를 측정하고(Wang and Wolfbeis, 2014), 전기화학 센서는 산소가 투과하는 막막(membrane)을 통해 내부로 투과된 산소의 산화-환원 반응을 이용하여 용존산소를 측 정한다. 해양학 연구에 주로 사용되는 광학센서로는 노르웨이 Aanderra사의 Oxygen Optode(4835, 4831, 4330 등), 미국 Sea-Bird사의 SBE63, 일본 JFE Advantech사의 RINKO series 등이 있고, 전기화학 센서로는 미국 Sea-Bird사의 SBE43, 미 국 YSI사의 Pro20 등이 있다. 이 중에서 전기화학 용존산소 센서가 가장 일반적으로 사용된다. 특히 막막형 전기화학 센서는 상대적으로 측정 속도가 빠르지만, 측정 과정에서 산소가 소모되며 특히 정기적으로 교정 및 유지 관리가 필요하다(Uchida *et al.*, 2010; Wei *et al.*, 2019).

센서를 통한 용존산소 측정값은 기기적인 특성상 시간에 따른 변형(drift)을 가져다주므로 실제 시료를 채취하여 화학적 적정법으로 용존산소의 농도를 얻어 이를 교정의 기준으로 사용하는 것이 원칙이다. 실제 해양환경에서 장기간 용존산소 센 서를 사용하는 경우 시간이 지남에 따라 센서에서 주는 값이 실제 분석값과의 차이가 점점 벌어져 약 3개월 후에는 5%에 이 른다(Sea-Bird Electronics, 2012). 특히, 오손 등이 거의 일어나기 어려운 환경에서의 실험을 통해서도 시간에 따른 차이가 있으며, 이러한 차이는 같은 종류의 센서라도 각각의 센서에 따라 그 정도가 다르다고 알려져 있다(Helm *et al.*, 2018). 따라 서 용존산소 센서를 사용할 때 현장에서 시료를 채취하여 분석한 값을 이용한 현장 교정은 반드시 필요하다.

센서 내 전자부품의 변화나 오손(fouling; 센서 표면에서 생물이 자라거나 수중의 유분 또는 다른 물질 등에 의해 코팅이 되 는 현상)이 수중 센서의 정확도를 일시적으로 떨어뜨리는 가장 중요한 요인이다. 최근에 제조 판매되고 있는 고가의 용존산 소 센서들은 매우 안정적인 내부 전자부품을 사용하므로 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 오손이라 할 수 있다. 이러한 오손을 방지하기 위해 센서의 제조사들은 묽은 Triton-X 등의 비전해액(non-ionic solution)으로 센서를 세척할 것을 권장한 다(Sea-Bird Electronics, 2012). 그럼에도 불구하고 시간이 지남에 따라 용존산소 센서의 성능 저하는 피할 수 없다.

설 틈 없이 작동하는 CTD에 부착된 센서들을 비교적 자주 실험실로 가져와 센서의 상태를 확인하고, 교정을 해준다면 좀 더 정확도 높은 자료의 획득이 가능하지만, 정기적이고 일상적인 점검에 비해 센서를 실험실에서 교정하는 일은 쉽게 이루어 지기 어렵다. 따라서 용존산소 센서를 이용하여 정확한 값을 얻기 위해서는 반드시 현장에서 적절하게 시료를 채취하여 화학 분석을 통해 얻은 용존산소 농도를 기준으로 센서가 주는 값을 교정하여 사용하는 것이 바람직하다. 일반적으로 용존산소 센 서에 대한 현장 교정은 수심별, 정점별로 다양한 농도 범위의 용존산소 시료를 채취해 분석한 값을 용존산소 센서에서 주는 값과 비교하여 적절한 교정식을 통해 이루어진다. 본 연구에서는 현장 자료를 바탕으로 1) CTD에 부착된 막막형 용존산소 센서의 현장 교정을 위한 방법, 2) 실측치와 비교하기 위한 적절한 측정 횟수, 그리고 3) 용존산소 센서의 적절한 실험실 교정 주기를 제시하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

용존산소 센서의 현장 교정을 위한 자료는 2017년부터 2018년까지 이사부호의 관측 작업이 수행되는 동안 인도양, 태평양, 동해에서 실시한 세 차례 관측을 통해 획득되었다(Fig. 1). 각각의 관측 동안 4~9개 정점에서 용존산소의 수직 분포를 고려하여 가능하면 넓은 농도 분포를 이루도록 총 133개의 용존산소 분석용 시료를 채취하였으며(Table 1), 연구에 사용된 용존산소 센서는 Sea-Bird Electronics사에서 제조된 박막형 용존산소 센서(Model: SBE43)이다. 이 센서는 본 연구가 시작되기 약 4개월 전 제조사에서 교정이 이루어진 후, 인도양 관측에서 처음으로 사용하였고, 이어 태평양과 동해에서도 모두 동일한 용존산소 센서를 사용하였다(S/N 3487). 이 센서의 최초 교정 당시 각종 교정 계수들은 Table 2와 같다.

채취된 시료의 용존산소 농도 분석은 화학적 적정법인 잉클러법(Winkler, 1888)을 이용하여 선상에서 시료 채취 후 6시간 이내에 분석이 이루어졌으며, 용존산소 적정기(KIMOTO DOT-05)를 이용하여 Sodium Thiosulfate 용액으로 적정하였다.

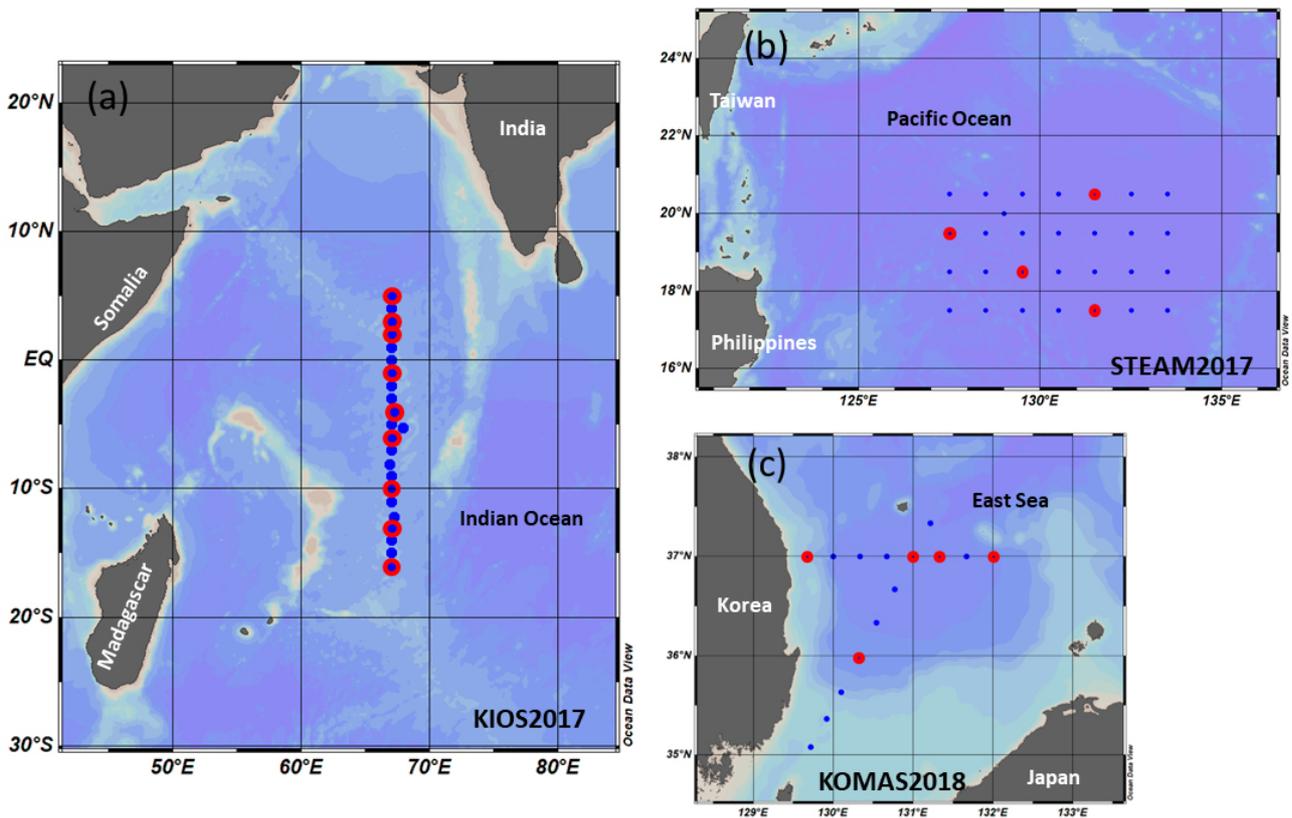


Fig. 1. Location maps of sample collection in the Indian Ocean (a), in the Pacific Ocean (b), and in the East Sea (c). Red circles denote the sampling points for this study.

Table 1. Information of each cruise for sample collection

Cruise	Area	Date	No. Stations	No. Samples
KIOS17	Western Indian Ocean	July, 2017	9	68
STEAM17	Western Pacific	September, 2017	4	32
KOMAS18	East Sea	January, 2018	5	33
Total			18	133

**Table 2.** Specification of the oxygen sensor used in this study

Model	SBE43
Serial No.	3487
Calibration Date	2017/Mar/09
Soc	4.257×10 <sup>-1</sup>
Voffset	-5.226×10 <sup>-1</sup>
A	-3.0596×10 <sup>-3</sup>
B	1.3922×10 <sup>-4</sup>
C	-2.0745×10 <sup>-6</sup>
D1	1.92634×10 <sup>-4</sup>
D2	-4.64808×10 <sup>-2</sup>
H1	-3.3×10 <sup>-2</sup>
H2	5.0×10 <sup>3</sup>
H3	1.45×10 <sup>-3</sup>
Tau20	1.36

Sodium Thiosulfate 용액은 약 2 mM 표준 KIO<sub>3</sub> 용액을 이용하여 표준화하여 사용하였다. 동일 정점의 동일 수심에서 채취한 시료를 4회 이상 분석하여 얻은 분석 정밀도는 최대 0.7 μmol L<sup>-1</sup> (0.016 mL L<sup>-1</sup>)로 0.7% 이내를 보였다.

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1 용존산소 센서의 현장 교정 방법

용존산소 센서에서 출력되는 용존산소 농도와 적정에 의한 용존산소 농도 사이에는 매우 좋은 상관관계를 보이지만, 세 번의 서로 다른 관측별로 비교하면 용존산소 센서의 실험실 교정 직후인 KIOS17에서 기울기가 가장 1에 가까운 값을 보였고, 절편 역시 거의 0에 가까운 값을 보였다. 시간이 지남에 따라 관측별로 기울기는 점차 감소하고 절편은 커지는 경향을 보였다 (Fig. 2). 이러한 경향은 서론에서 언급한 바와 같이 용존산소 센서로부터 정확한 용존산소 농도 값을 얻기 위해서는 용존산소 센서에 대한 현장 교정이 필요하다는 것을 보여준다.

본 연구에서 사용한 CTD용 용존산소 센서(SBE 43)의 제조사인 Sea-Bird Electronics사에서는 Application note No. 64-2 “SBE 43 Dissolved Oxygen sensor calibration and Data Correction using Winkler Titration”이라는 자료를 통해 Owens and Millard(1985)의 연구 결과를 기반으로 실험실에서의 교정작업에서 얻는 각종 교정계수(Table 2)를 얻는 것과는 달리 간단한 용존산소 센서의 현장 교정 방법을 제안하고 있다(Sea-Bird Electronics, 2012).

$$\text{Oxygen (ml/l)} = S_{oc} * (V + V_{offset}) * \Phi \quad (1)$$

여기서  $S_{oc}$ 는 비례상수이고,  $V$ 는 용존산소 센서의 출력 전압(volt),  $V_{offset}$ 은 용존산소 농도가 0일 때의 출력 전압(volt),  $\Phi$ 는 수온과 압력의 영향과 수온과 염분의 함수인 용존산소의 용해도를 포함하는 계수이다. 즉, 직접 채취된 시료를 분석하여 얻은 값과 센서의 전압값을 사용하여 분석값과 센서 전압값 사이의 직선 관계식에서 기울기를 이용하여  $S_{oc}$ 를, 절편과 구해진  $S_{oc}$ 를 이용하여  $V_{offset}$ 를 구해내는 방법이다(Sea-Bird Electronics, 2012). 또한 제조사에서는  $\Phi$ 는 센서의 사용 시간이나 오손에 상관없이 일정한 값을 유지하므로 현장 교정에서는 이 값을 무시하는 것으로 제안하고 있다(Sea-Bird Electronics, 2012).

그러나 용존산소 센서에서 출력되는 용존산소의 농도와 시료의 적정에 의한 용존산소 농도를 비교하면 매우 좋은 상관관계를 보이는(Fig. 2) 점으로부터 본 연구에서 제안하는 현장 교정법은 CTD 용존산소 센서의 실측값과 적정을 통해 얻은 용존산소 실측값 사이의 상관관계를 통해 간단한 교정식을 산출해내어 교정하는 방법이다. 즉, Fig. 2와 같이 적정값과 센서값 사이의 직선의 관계식을 구하여 이를 센서값에 적용하여 교정하는 방법이다.

본 연구에서 수행한 세 번의 관측에서 제조사의 방법에 따라 용존산소 센서를 교정한 자료와 분석값을 비교해보면, 각 관측별로는 각각 매우 좋은 상관관계를 보여주지만 세 번의 관측이 서로 다른 값을 보인다(Fig. 3(a)). 즉, 서로 다른 항해의 관측 자료를 서로 비교하기에는 그 불확실성이 높아진다. 그러나 본 연구에서 제안한 방법에는 각 항차에 따른 차이가 거의 보이지 않는다(Fig. 3(b)).

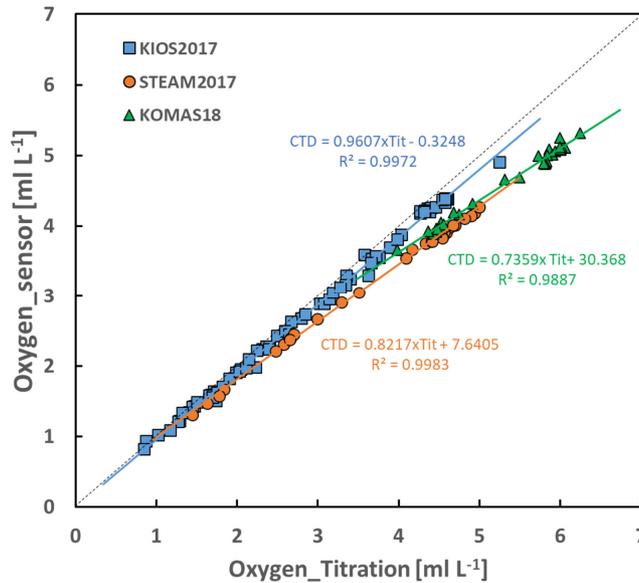


Fig. 2. Comparison of dissolved oxygen concentration from CTD sensor and titration.

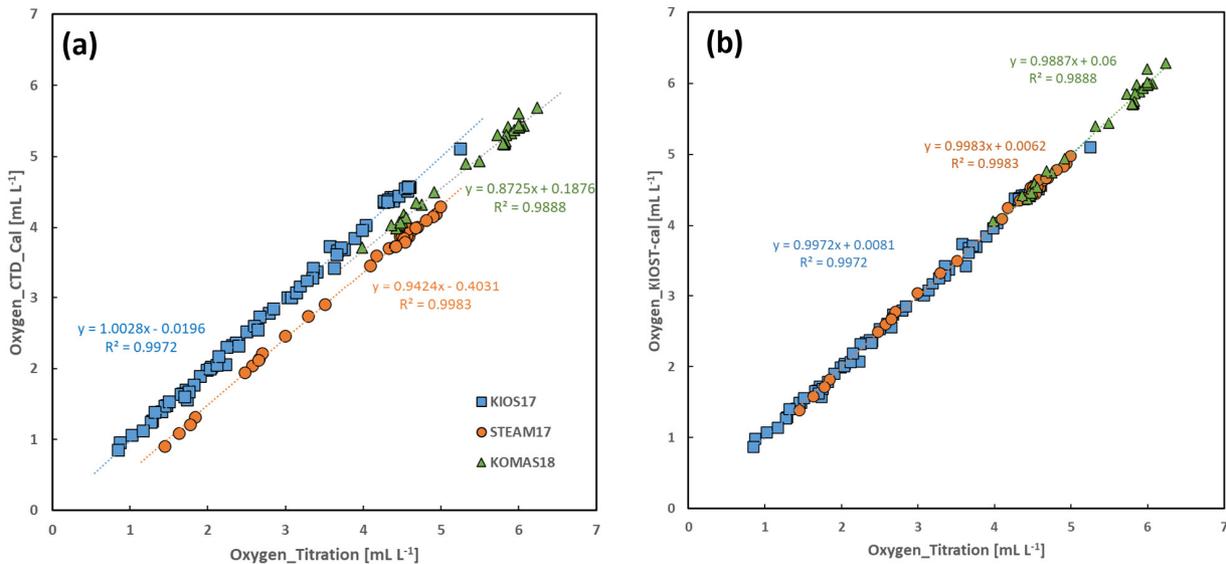


Fig. 3. Comparison of dissolved oxygen concentration from calibrated CTD sensor values based on the method suggested (a) by the manufacturer and (b) by this study with titration values.

이러한 차이를 보이는 원인을 살펴보기 위해서, 용존산소 센서값과 적정에 의한 분석값의 차이(Residual)를 비교해보면 실험실 교정이 이루어진 후 최초로 사용된 KIOS17에서는 수심에 따라 거의 일정하고 그 값도 대부분  $-0.2 \text{ mL L}^{-1}$  이하이지만 시간이 갈수록 얽은 수심에서 그 값이 점점 커짐을 알 수 있다(Fig. 4). 게다가 어느 정도 시간이 지나 residual 값의 차이를 보이는 STEAM17과 KOMAS18의 자료에서는 대략 수심 500 m보다 깊은 시료보다는 수심이 얽은 시료에서 더 큰 차이를 보인다(Fig. 4). 동해의 경우를 제외하면 residual의 차이를 보이는 수심 500 m는 수온은 거의  $10^\circ\text{C}$ 에 해당한다. 용존산소 센서가 주는 전압과 측정된 용존산소 농도를 비교하여 보면, 수온  $10^\circ\text{C}$ 와 수심 500 m를 기준으로 뚜렷하게 구별된다(Fig. 5).

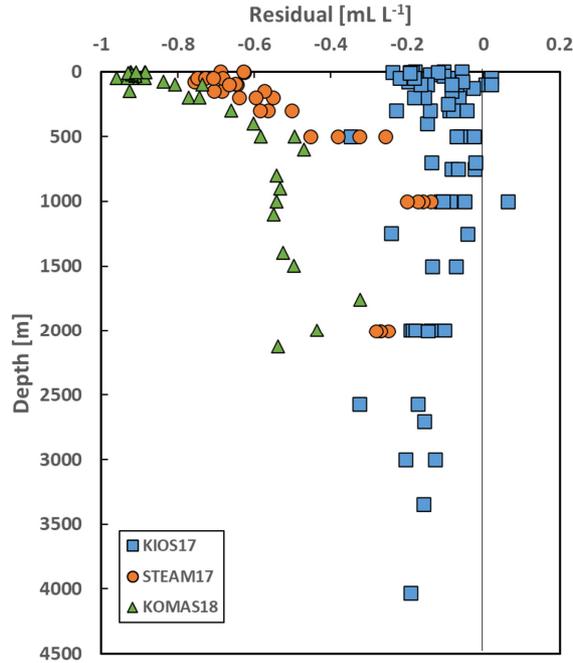


Fig. 4. Vertical distribution of dissolved oxygen residual (Sensor value - Titration value).

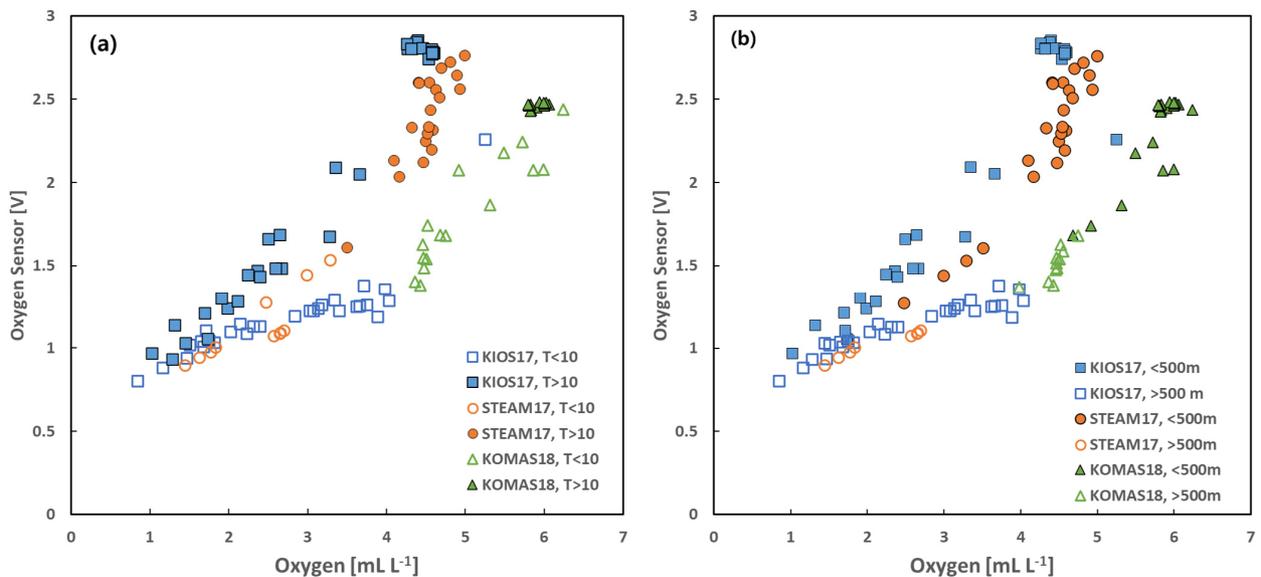


Fig. 5. Comparison of the output voltage with dissolved oxygen concentration separated by (a) temperature ( $10^\circ\text{C}$ ) and (b) depth (500 m).

제조사가 제안한 교정 방법에 따르면 용존산소 센서 전압과 용존산소의 농도는 비례한다. 식[1]에서  $\phi$ 를 무시한다면 동일한 항차에서 센서 전압과 용존산소 농도는 하나의 직선 관계로 표현되어야 하는데, 수온과 수심에 따라 구분되어 상수로 정의된  $S_{oc}$ 이외에 더 고려되어야 할 항목이 있다고 할 수 있다. 따라서 Fig. 5에서 보이는 결과를 통해, 수심이 깊고, 수온과 염분의 변화가 많은 해역에서는 수온과 염분 그리고 압력에 의해 결정되는 식[1]의  $\phi$ 를 무시할 수 없다는 결론에 도달하게 된다. 수온의 변화가 크고 수심이 깊은 경우 각각의 항목을 고려하여 교정해야 할 필요가 있다는 기존의 연구 결과도 존재한다(Kim *et al.*, 1999).

그러나  $\phi$ 에 대한 정확한 정의가 없는 상태에서 이를 특별히 고려하여 교정하기는 어렵다. 따라서, 본 연구에서는  $S_{oc}$ 와  $\phi$ 가 모두 포함되어 계산된 용존산소 센서의 용존산소 농도와 해수 시료를 채취하여 분석된 용존산소 농도를 직접 비교하여 항차마다 직선의 관계식을 얻어 해당 관계식의 기울기와 절편을 이용하여 센서의 용존산소 농도를 직접 교정할 것을 제안한다.

일반적으로는 윈클러법으로 해수의 용존산소 분석을 위해 현장에서 산소를 고정하고 난 뒤 약 10 - 12시간 동안은 거의 변화가 없는 것으로 알려졌다(Grasshoff, 1983). 그러나 용존산소용 시료병에 용존산소를 고정한 후 아무런 조치 없이 보관하는 경우 용존산소 농도가 일주일 뒤 약 6%, 한 달 뒤에는 약 18%, 약 두달 뒤에는 약 60% 정도 증가한다는 연구가 있다(Zhang *et al.*, 2002). 따라서 가능하면 현장에서 12시간 이내에 분석하는 것이 바람직하다. 그러나 부득이 용존산소 고정 후 장기간의 보관이 필요한 경우에는 용존산소가 고정된 시료병을 물 속에 보관하거나, 용기의 위쪽 가장자리에 물을 채운 상태를 유지하여 보관해야 한다(Zhang *et al.*, 2002).

### 3.2 현장 교정을 위한 최적의 자료 개수

정확도 높은 용존산소 센서의 교정을 위해서 필요한 적절한 채수 시료의 개수를 결정하기 위하여 연구에 사용된 133개의 시료에 관한 결과를 무작위로 추출하여 직선의 관계식을 구하고 관계식을 구한 시료의 개수에 따라 관계식의 기울기, y 절편 값과 상관계수의 변화를 살펴보았다. 시료의 숫자가 늘어날수록 기울기와 y 절편, 상관계수가 모두 일정한 값에 수렴하였다(Fig. 6). 이러한 경향은 세 번의 항차 각각의 자료들로만 보아도 동일하게 나타났다.

일반적으로 윈클러법을 이용한 용존산소의 측정 정밀도는 0.1-0.5%로 알려져 있지만(Carpenter, 1965; Wei *et al.*, 2019) 해수 시료의 채취 과정 등을 모두 고려하면 이보다는 정밀도가 다소 큰 범위를 보일 것으로 예상된다. 또한 본 연구에서 사용된 용존산소 센서의 정확도는 2%이다. 따라서 두 가지 자료를 비교한 교정의 경우에는 정확도가 최대 약 2%( $=\sqrt{2^2 + 0.5^2}$ )에 해당한다. 그러나 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 두 자료간의 직선의 기울기가 일정한 값에 수렴하는 구간의 상대 편차는 약 1%로, 이때 시료의 개수는 30개이다. 따라서 최소한 30개 이상의 시료를 이용하여 용존산소 센서의 현장 교정이 수행되어야

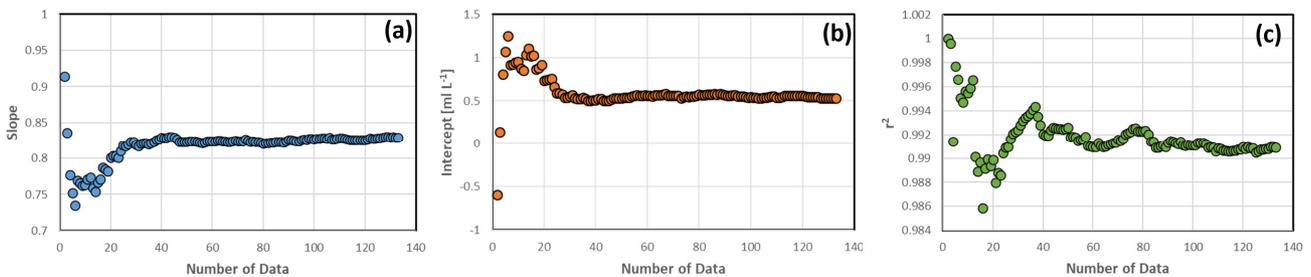
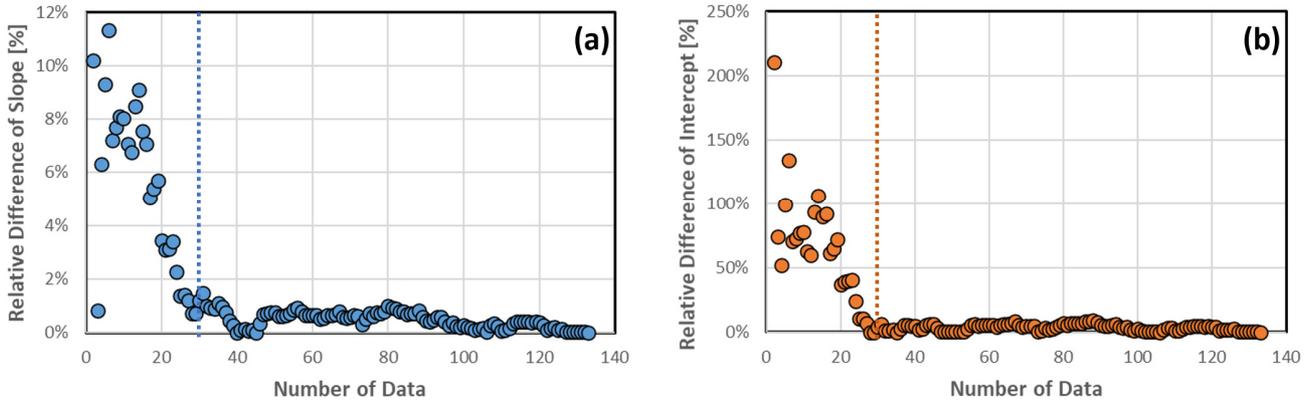


Fig. 6. Changes of (a) slope, (b) intercept, and (c) correlation coefficients ( $r^2$ ) of the calibration curve according to the number of samples(n).



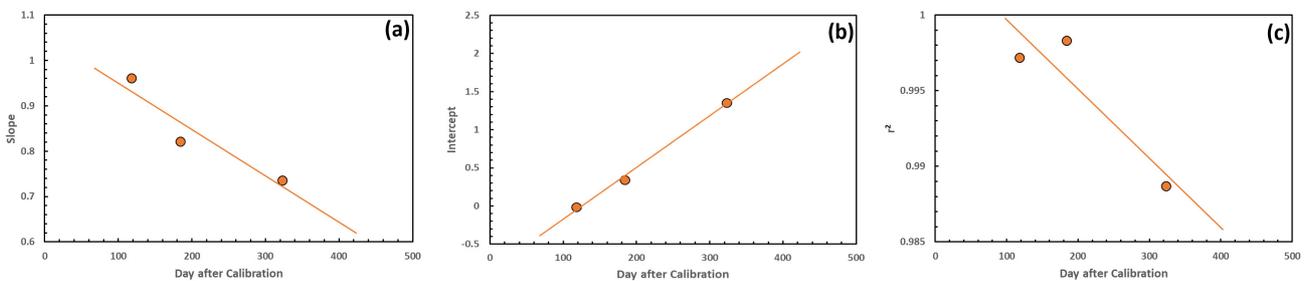
**Fig. 7.** Changes of relative difference of (a) slope and (b) intercept of the calibration curve according to the number of samples(n).

약 1% 이내의 정밀도를 가진 현장 교정이 이루어질 것으로 판단된다. 일반적으로 통계학에서 모집단의 분포가 정규분포인지의 여부와 관계없이 표본의 크기가 커질수록, 특히 30 이상이 되면, 표본 평균의 분포가 거의 정규분포를 이루기 때문에 통계적 추정과 관련된 모든 문제해결을 위해 정규분포가 갖는 특성들을 적용할 수 있다고 알려져 있다(Williams, 1978). 본 연구의 결과도 통계학에서 일반적으로 알려진 내용과 잘 일치한다.

### 3.3 박막형 용존산소 센서의 실험실 교정주기

앞서 설명한 바와 같이 용존산소 센서는 시간에 따라 변형이 일어나며, 특히 박막형 센서는 유기물로 이루어진 박막의 오손에 의해 정확도가 떨어질 수 있다. 따라서 용존산소 센서의 성능이 일정 수준 이하로 떨어지는 경우에는 제조사에서 시행하는 실험실 교정을 받거나 필요한 경우에는 박막 등의 부품을 교체해야 한다. 그러나 센서의 성능 저하에 대한 기준이 명확하지 않아 교정 시기를 파악하기 쉽지 않다.

본 연구에서 수행한 133개의 용존산소 분석 자료를 이용하여 박막형 용존산소 센서에 대한 실험실 교정주기를 추정하여 보았다. 용존산소 센서의 최초 실험실 교정일(2017년 3월 9일)로부터 시간의 경과에 따른 용존산소 센서의 성능을 용존산소 분석값과 용존산소 센서값 간의 상관관계의 기울기, y 절편 및 상관계수를 통하여 비교하였다(Fig. 8). 용존산소의 분석값을 참값으로 보았을 때, 교정 후 1년 정도(323일)가 경과한 KOMAS18의 자료를 살펴보면 하면 용존산소 센서값이 참값의 74%의 값을 보이고 y 절편 역시 1.4 ml l<sup>-1</sup>로 용존산소 값의 10~60%에 해당하며, 결정계수(r<sup>2</sup>) 역시 99% 이하로 작아진다(Fig. 8).



**Fig. 8.** Changes of (a) slope, (b) intercept (ml l<sup>-1</sup>), and (c) determination coefficients (r<sup>2</sup>) of the calibration curve with the time after laboratory (manufacturer) calibration.

KOMAS18 자료를 이용하여 일반적인 최소제곱법에 의한 합성 불확도를 계산하면(Woo *et al.*, 2003) 2.9%의 값이 얻어진다. 이는 본 연구에 사용한 용존산소 센서의 정확도(2%)를 상회하는 값으로 센서의 신뢰성이 떨어졌다고 볼 수 있다. 따라서 박막형 용존산소 센서는 최소한 1년을 주기로 점검을 통해 실험실 교정 또는 박막의 교체가 적절할 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

용존산소 센서를 이용하여 해수 중의 정확한 용존산소 농도를 측정하기 위해 반드시 필요한 용존산소 센서의 현장 교정의 방법과 적절한 측정 횟수 및 용존산소 센서의 실험실 교정주기에 대한 방법을 제시하고자 약 1년에 걸쳐 세 번의 서로 다른 항차에서 총 133개의 시료를 대상으로 화학 분석을 통해 얻은 용존산소 분석값과 센서값을 비교 분석하였다. 그 결과 용존산소 센서로부터 얻는 용존산소 농도의 현장 교정 방법은 센서에서 주는 최종 농도값과 분석값을 직접 비교하여 얻은 직선의 관계식을 이용하여 센서의 측정값을 교정하는 것이 바람직하고, 정확한 보정을 위해서는 최소한 30개 이상의 시료에 대한 분석값을 이용해야 약 1% 이내의 정밀도 범위 내에서 현장 교정이 가능하다. 또한 CTD용 박막형 용존산소 센서가 제조사가 제시하는 정확도 이내의 성능을 내기 위해서는 1년 이내의 주기로 실험실 또는 제조사에서 이루어지는 실험실 교정을 수행할 것을 권장한다.

## 사 사

이 논문은 2022년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20220548, 인도양 한-미 공동 관측 및 연구, PM63470). 이사부호의 CTD operation에 많은 도움을 주신 이경목, 정우영, 김대연 관측사님들께 감사드립니다. 아울러 이 논문을 면밀히 심사해 주시고 좋은 조언을 주신 두 분의 심사위원께 감사드립니다.

## 참고문헌(References)

- Carpenter, J.H., 1965. The accuracy of the Winkler method for dissolved oxygen analysis. *Limnol. Oceanogr.*, **10**(1): 135-140.
- Grasshoff, K., 1983. Determination of oxygen. In: *Methods of Seawater Analysis*, edited by Grasshoff, K., M. Ehrhardt, and K. Kremling, Verlag Chemie, Weinheim, pp. 61-72.
- Helm, I., G. Karina, L. Jalukse, T. Pagano and I. Leito, 2018. Comparative validation of amperometric and optical analyzers of dissolved oxygen: a case study. *Environ. Monit. Assess.*, **190**: 313.
- Kim, K.-R., K. Kim, D.-J. Kang, S.Y. Park, M.-K. Park, Y.-G. Kim, H.S. Min and D. Min, 1999. The East Sea (Japan Sea) in Change: A Story of Dissolve Oxygen. *MTS J.*, **33**(1): 15-22.
- Owens, W.B. and R.C. Millard Jr, 1985. A New Algorithm for CTD Oxygen Calibration. *J. Phys. Oceanogr.*, **15**(5): 621-631.
- Sea-Bird Electronics, 2012. SBE 43 Dissolved Oxygen Sensor Calibration and Data Corrections. SBE Application Note No.64-2, 5 pp.
- Uchida, H., G. Johnson and K. McTaggart, 2010. CTD oxygen sensor calibration procedures, in *The GO-SHIP Repeat Hydrography Manual: a Collection of Expert Reports and Guidelines*, edited by E. Hood, C. Sabine, and B. Sloyan.
- Wang, X.D. and O.S. Wolfbeis, 2014. Optical methods for sensing and imaging oxygen: Materials, spectroscopies and applications. *Chem. Soc. Rev.*, **43**: 3666-3761.

- Wei, Y., Y. Jiao, D. An, D. Li, W. Li and Q. Wei, 2019. Review of Dissolved Oxygen Detection Technology: From Laboratory Analysis to Online Intelligent Detection. *Sensor*, **19**: 3995. DOI: 10.3390/s19183995.
- Williams, B., 1978. A sampler on sampling. John Wiley & Sons, New York, 254 pp.
- Winkler, L.W., 1888. Die Bestimmung des im Wasser gelösten Sauerstoffes. *Chem. Ber.*, **21**(2): 2843-2855.
- Woo, J.-C., J.K. Suh, M.C. Lim and M.S. Park, 2003. A study on the treatment of uncertainty in linear regression method for chemical analysis. *Anal. Sci. Technol.*, **16**(3): 185-190 (in Korean).
- Zhang, J.-Z., G. Berberian and R. Wanninkof, 2002. Long-term storage of natural water samples for dissolved oxygen determination. *Water Res.*, **36**(16): 4165-4168.